

המוץ אמצעי לוחמה אלקטרונית להגנת מטוסים

סא"ל י. *

כבר בשלהי 1937 הועלה נושא פיתוח המוץ והשימוש בו או כפי שנקרא אז Smoke-Screen (מסך-עשן) לזיוכוח בק-היליה המדעית-ביטחונית בבריטניה, והוא נדחה על הסף, ובדיעבד אולי גם בצדק. התיאוריה וההסברים המדעיים הקשורים במוץ היו כבר ידועים במידה זו או אחרת, אך היה חשש מוצדק שפיתוח המוץ ישמוט את הקרקע מתחת לרגליה של מערכת המכ"ם, שנמצאה אז בפיתוח והכל תלו בה תקוות כה רבות. באותה תקופה הועלו בבריטניה אף רעיונות בדבר פיתוח מכ"ם אינפרא-אדום, אשר יהיה חסין מפני מוץ לסוגיו השונים. אולם הערכות לגבי כיצועיו של מכ"ם כזה, ולו מבחינת המרחקים והתנאים האטמוספריים בהם הוא יהיה מסוגל לפעול דחו את הרעיון למשך שנים רבות.

השימוש במוץ היה נוח ממספר סיבות: ראשית, הפעלתו פשוטה: הטלה מן האוויר של חבילות המכילות אלפי חתיכות אלומיניום, שאורכן נע בין מספר סנטימטרים למספר עשרות ס"מ, שנית, היה בו גורם ההטעייה והתרמית (ואמנם בסוף המלחמה נעשה שימוש במוץ להטעייה באופן מסיבי: מטוסי מוסקיטו היו מפזרים מוץ ליצירת רושם של התקפות אוויריות מדומות. הדבר כונה בפי האנגלים: Spoof raids) ושלישית, יעילותו של המוץ ושהייתו הארוכה באוויר: תכונותיהן האוויריות דינמיות של רצועות המוץ מאפשרות להן לשקוע באיטיות רבה תוך כדי הסחפותו עם הרוח.

כאשר דנו לראשונה במפקדת חיל האוויר הבריטי על שימוש מבצעי במוץ במלחמה, היה זה דווקא כנגד אש נ"מ מבוקרת מכ"ם. הדבר נבע בעיקר מלחצו של פיקוד המפציצים, אשר גרס שהאש נ"מ היא הגורם העיקרי להפלת מטוסינו ולא מיירטי הלילה, כפי שסברו

מכ"ם (רפלקטורים) טובים, יעילים ופשוטים. אלה הם רדידי "מוץ"... המדובר ברצועות וברדידים מאלר-מיניום החתוכים בצורות שונות תוך ניצול תופעת התהודה להגברת ההחזרה מהם. הרברים הבאים יעסקו במוץ, שהוא אחד האמצעים הפשוטים והיעילים המצויים בשימוש בשרה הלוחמה האלקטרונית מאז מלחמת העולם השנייה ועד ימינו.

פיתוח המוץ והכנסתו לשימוש

בשנות ה-30 נערכו בצרפת, בגרמניה, בבריטניה ובארה"ב, מחקר ופיתוח בתחום המכ"ם. עד סוף שנות ה-30 היו האמריקנים המובילים בשטח זה (ב-1932 היה בידם מכ"ם מעבדתי, שהיה מסוגל להבחין במטוס ממרחק של 80 ק"מ), ומכאן והלאה עברה הבכורה למדינות אירופה אשר עמדו על סף מלחמה.

באמצע שנות השלושים קיבל הפיתוח בבריטניה תנופה. תמיכה כספית ממשלתית גדולה אפשרה להציב בזמן תחנות מכ"ם מבצעיות, אשר שימשו להתרעה ולניהול ה"קרב על בריטניה". הגרמנים החלו בפיתוח מואץ בתחילת שנות ה-30, ובפרוץ מלחמת העולם השנייה היו מצוידים ברשת מכ"מים להתרעה ולניווט וכן במכ"מים ימיים ובמכ"מים מוטסים.

במהלך מלחמת העולם השנייה (ואולי עוד לפניה) הכירו הצרדים הלוחמים בחשיבות הפיתוח של אמצעים כנגד מערכות המכ"ם של האויב. פותחו ונוסו אמצעים שונים וטכניקות אחדות לשיבוש ולהטעייה ולכל אמצעי חדש נתבקשה התשובה הנגדית.

** בפי האנגלים הם נקראים WINDOW, בפי האמריקאים CHAFF ובפי הגרמנים DUEPPEL.

המכ"ם הגו מערכת אלקטרונית המשתמשת בגלי רדיו לגילוי מטרת: מטוסים, כלי רכב ותוואים גיאוגרפיים. עקרון הפעולה של המכ"ם מבוסס על שידור גלים אלקטרומגנטיים, אשר פגיעתם בגוף פלשהו גורמת להחזרת חלק מהאנרגיה שלהם גם בכיוון המכ"ם המשדר. הגלים הנקלטים במכ"ם עוזרים תהליך של בדיקה ובחינה (עיבוד אותות), המאפשר לקבל את המידע הבא על המטרה: האם יש מטרה או "אין מטרה"; מהו המרחק למטרה ומה כיוונה; מהי מהירות המטרה (גודל וכיוון); מהו גודל המטרה.

הספק הקרינה האלקטרומגנטי המוחזר מהמטרה והנקלט במכ"ם תלוי בתכונות המכ"ם ובמטרה.

תכונות המכ"ם החשובות הן: עצמת השידור, התדר שלו ואיכות האנטנה בשידור ובקליטה. מבחינת המטרה יש חשיבות למרחקה מן המכ"ם, ולגודל "השטח המחזיר" שלה.

כאשר דנים בשאלת ההגנה על מטוסים מפני גילויים על-ידי מכ"ם, יש להניח שהמכ"ם הוא גורם נתון ולכן יש לעסוק במטרה – במטוס עצמו – כלומר ב"שטח המחזיר", או כפי שהוא מוגדר בשפה המקצועית: שטח החתך המכ"מי. ואמנם בתכנוני מטוסי קרב מתקדמים הפרמטר של גודל שטח החתך המכ"מי הגו מהחשובים ביותר. אך ישנן גם שיטות אחרות להגנה על מטוסים מפני גילוי: אחת מהן היא יצירת "מסך" של מטרת כוזבת, אשר מאחוריו ניתן להסתיר מטוסים. כדי לבצע שיטה זאת דרושים מחזירי הד

* מהמס אלקטרוניקה, טייס בחיל האוויר.

אחרים. אולם גם במקרה זה נדחה השימוש במוץ לאור לחצם של מיירטי הלילה הבריטים, אשר היו משוכנעים שיעילותם כנגד מפציצי לילה גרמניים מפעילי מוץ (להגנה עצמית) תהיה אפסית.

בפעמים הבאות, כאשר הועלה הנושא לדיון מחודש במפקדת חיל האוויר הבריטי הוא נדחה. החשש היה שאם ישתמשו הבריטים במוץ, ישתמשו בו גם הגרמנים וכמות המוץ שתידרש לגרמנים לחסימת כל תחנות המכ"ם הבריטיות היא אפסית (בערך טונה). השימוש בכל אמצעי לוחמה אלקטרוני חדש מחייב חישוב מהלכים מדוקדק, שכן את מלוא היתרונות ממנו כגורם חדש ניתן להפיק רק בתקופה מוגבלת (עד שהאויב מוצא לו מענה). עובדה זאת הייתה נעוצה בשורשם של כל הוויכוחים בדבר הפעלתם או אי הפעלתם של אמצעי ל"א, אשר הכתיבו בצורה זו או אחרת את כללי המשחק. השימוש במוץ היה שונה משאר האמצעים ללוחמה במכ"מים הגרמניים, שעמדו בזמנו לרשות בעלות הברית, בגלל ההשלכות על ביטחון האוכלוסייה האזרחית, אשר היה תלוי במערכות ההתרעה המכ"מיות. ואכן השימוש במוץ הצריך את אישורו של הקבינט המלחמתי.

הוויכוח על שימוש במוץ נמשך כש שנים, עד אשר בסופו של דבר החליט וינסטון צ'רצ'יל ביולי 1943 על שימוש בו אולם לא לפני הפלישה לסיציליה. במהלך 1942 ערכו הגרמנים מספר ניסיונות עם מוץ, חלקם באזור ברלין וחלקם באזור הים הבלטי. תוצאות ניסויים אלה היו כה חמורות ודרמטיות לגבי מערכות המכ"ם שנבדקו, עד שמפקד חיל האוויר הגרמני, הרמן גרינג, החליט לגנוז את הרעיון והורה להשמיד את כל הדו"חות על הנושא, כדי למנוע מהבריטים לאמץ את הרעיון. יוצא אפוא שבמשך יותר משנה היסטו הבריטים והגרמנים כאחת ל- השתמש במוץ האחד כנגד השני מפחד שמא ייצא שכרם בהפסדם.

השימוש במוץ הביא מיד לתוצאות הרסניות על מערכת השליטה והבקרה הגרמנית, ולמעשה עד סוף המלחמה היה המוץ אמצעי יעיל והרסני שהגי רמנים התקשו להתגבר עליו. גם במהלך הפלישה באירופה נעשה שימוש במוץ כולל הטעייה ימית (מטוסים פיזרו מוץ בגובה נמוך כדימוי לצי גדול, אשר נע במהירות 8 קשר לכיוון דרום מערב

צרפת). הגרמנים עצמם החלו להשתמש במוץ ב-1944 אולם אז כבר הייתה מפת הקרב שונה, ולכן הדבר לא בא לידי ביטוי ממשי.

מהו המוץ?

רצועות המוץ מתוכננות להוות דיפולים הנכנסים לתהודה בתדירויות של המכ"מים שיש לשבש.

אורך הדיפולים (d) הוא כמחצית אורך הגל (ג) של קרינת המכ"ם המשובש, כלומר $d = \frac{\lambda}{2}$.

שטח החתך המכ"מי המרבי או במלים אחרות ההחזר המכ"מי המקסימלי המושג מרצועת מוץ מתרחש כאשר הרצועה מכוונת במקביל לשדה החשמלי ובניצב לכיוון ההתקדמות של קרינת המכ"ם הפוגעת בה. נמצא מי שחישוב ומצא שאם רצועות המוץ עשויות מאלומיניום בעובי 0.001 אינץש, אורך השדה ל- $\frac{\lambda}{2}$ ורוחבן 0.01 אינץש אזי שטח החתך המכ"מי יהיה

$$\frac{W}{A} \approx 6667 \text{ מ"ר}$$

כאשר w המשקל בקילוגרמים, ו-f הוא תדר השידור בגיגהרץ (10⁹). ניתן לראות שמחבילת מוץ של 450 גרם ובתדר שידור של 3 GIZ ניתן לקבל שטח חתך מכ"מי של 1000 מטר רבוע. כאשר שטח חתך מכ"מי של מטוס בודד הוא לכל היותר בסדר גודל של מטרים בודדים מובן שאם רוצים לכסות תחום תרדים נרחב בחבילת מוץ אחת, אזי שטח החתך המכ"מי בכל תחום התדרים הוא קטן יותר. לדוגמא: ניתן לקבל מאותה חבילת מוץ של 450 גרם, רק שטח של כ-60 מטר רבוע, בכל התחום שבין 1 ל-10 גיגהרץ. השימוש במוץ עבור מכ"מים שתדרי השידור שלהם הם מתחת ל-500 מגהרץ (10⁶) או עבור אורכי גל גדולים מ-60 ס"מ, מחייב שינויים בצורת האריזה ובשיטת החיתוך של הדיפולים.

רדידי המוץ הם כעלי תכונות אווירי-דינמיות כאלה המאפשרות להם לנוע כמעט במהירות הרוח ולשקוע בקצב נמוך. עובדות אלו באות לידי ביטוי כאשר מנתחים את תדרי הדופלר הנקלטים באות המוחזר מענן המוץ.

תדר הדופלר הוא אותו תדר הנוסף לתדר המשוך כתוצאה מהעובדה שהגוף המחזיר נמצא בתנועה רדיאלית יחסית למקלט/למשדר.

בניתוח תדרי הדופלר המתקבלים ממוץ ניתן לחלק את הגורמים להם לחמישה:

• השתנות עצמת הרוח עם הגובה —

כתוצאה מעובדה פיזיקאלית זו נוצר מצב בו בתוך אותה אונת מכ"ם, הסורקת ענן מוץ אחד, קיימים "גופים" בעלי מהירויות רדיאליות שונות (ראה שרטוט מס' 1), כאשר הפיזור במהירות תלוי ישירות בגובה.

• רוחב האונה — אונת המכ"ם היא בעלת רוחב מסוים, ולכן בחלק מענן המוץ המצוי בתוכה קיימות מספר "מהירויות מוץ" רוחביות (שהרי המוץ איננו גוף אחיד ומוצק).

• מערבולות אוויר — הגורמות לתנועות הרדידים בצורות שונות בתוך ענן המוץ וכך באותה אונת מכ"ם גורמות תנועות אלו למהירויות רדיאליות, ואלו באות לידי ביטוי בתדרי דופלר שונים הנקלטים במכ"ם.

• מהירויות נפילה (שקיעה) שונות — במהלך שקיעתם של רדידי המוץ הם מקבלים מהירויות שונות (כמעט כמו כל גוף אחר שנופל נפילה חופשית לתוך שאיננו ריקנות).

• תנועת אנטנת המכ"ם — רכיב זה אינו תלוי בתכונות רדידי המוץ עצמם, אלא בתכונות המכ"ם עצמו, באופי תנועת האנטנה ובשיטת עיבוד האותות המתקבלים, ואולי אף בצורתו של ענן המוץ, שהרי מזוויות שונות ייתכן שצורתו וצפיפותו שונות. בגלל היות רכיב זה בלתי תלוי בתכונות המוץ עצמו, נהוג להתעלם ממנו בהקשר למוץ מתוך הנחה שהוא מטופל בעיבוד האותות במכ"ם ואיננו אופייני במיוחד למוץ.

בתכנונים המבצעיים לשימוש במוץ נלקחים בחשבון הגורמים הבאים:

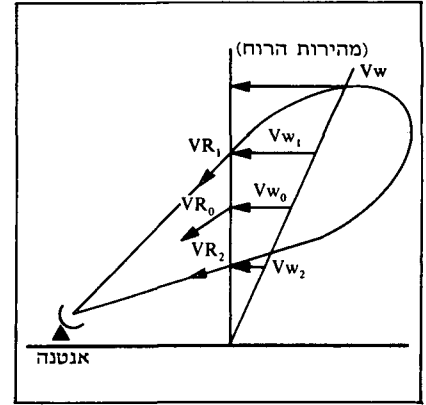
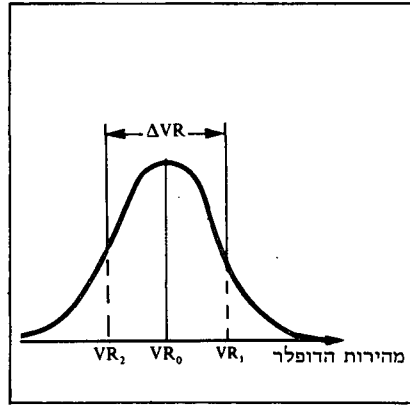
- צורת הענן המבוקש (שטח או אנכי).
- מקום הענן (טווח מהמכ"ם וגובה הפיזור).
- קצב תפיחת הענן או קצב גידול נפח הענן.
- הזמן הרצוי להשיגה באוויר.
- השתנות צפיפות המוץ עם הזמן.
- סוג המוץ (גודל רידידים וצורת חיתוכם).
- שיטת הפיזור.
- שיטת האריזה.

הפרמטרים הללו תלויים זה בזה, אולם כולם יחד מוכתבים בהתאם לצורך המבצעי, או במלים אחרות, בהתאם לסוגי המכ"ם שנגרם על המוץ לפעול (מכ"ם חיפוש או מכ"ם עקיבה) ובהתאם למשימות שהשימוש במוץ נועד למלאן: הגנה עצמית, מיסוך או הטעייה.

המכ"ם בשיטה שהוזכרה, עלולים גם למחוק מטוסים הנמצאים באותו ענן מוץ. (כמו כן מקטינה הפעלת טכניקה זאת את יכולת קליטתו של המכ"ם).

סיכום

ניתן לומר שתכונותיו המיוחדות של המוץ אפשרו לו להישרד בזירת הקרב של הלוחמה האלקטרונית גם כמה עשרות שנים לאחר התחלת השימוש בו. התפתחות המוץ קשורה בהכנה מעמיקה יותר של תכונותיו ובהכרה מעמיקה יותר של השפעותיו על מערכות מכ"ם מתוחכמות וחדישות יותר, ולצורך לימוד זה מפותחות כיום בעולם מערכות ניסוי ומדידה של מוץ מול תחומי התדר השונים. כתוצאה מההתקדמות המהירה ומהקצב המואץ של פיתוח הטכנולוגיה בימינו, קשה להעריך את מקומו ואת יכולת השפעתו של המוץ על שדה הקרב האווירי העתידי.



שרטוט מס' 1: השפעת פילוג עצמות הרוח עם הגובה על מהירות הדופלר המתקבלת מענן מוץ.

כיצד להתגונן כמוץ בפני מכ"מים שונים

קיימים סוגים שונים של מכ"מים ה-נבדלים זה מזה בתכונותיהם ובביצועיהם. מקורם של ההבדלים הוא בדרך כלל ביעוד השונה של כל מכ"ם ומכ"ם ובפתרונות הטכנולוגיים השונים שמומרו בו. כאשר מבקשים להתגונן בפני מכ"מים אלו בעזרת מוץ יש להכירם היטב. לשם דוגמה ננתח באופן פשטני שני סוגי מכ"ם ונבהיר כיצד ניתן להתגונן נגדם במוץ.

הסוג הראשון הוא מכ"ם החיפוש או הגילוי: תפקידו העיקרי של מכ"ם זה הוא למצוא את כיוון המטרה ואת המרחק ממנה אך לא את גובהה, מכאן שאלומת השידור של מכ"ם כזה תהיה מאוד צרה במישור האופקי (אבחנה טובה בכיוון) אולם מאוד רחבה במישור האנכי (אי אבחנה בגובה). משמעות הדבר היא שלמכ"ם כזה יש כושר אבחנה בין שני מטוסים הנבדלים זה מזה בכיוונם היחסי למכ"ם או במרחקם ממנו, אולם שני מטוסים הנמצאים

באותו כיוון ובאותו הטווח, כלפי המכ"ם, אבל בגבהים שונים ייראו כמטרה אחת. ענן מוץ, אשר יפוזר מול מכ"ם כזה, יסתיר כל מטוס הנמצא במרחב האווירי מתחת לענן זה ומעליו ובלא תלות בעוביו של הענן, כל עוד החזרתו טובה.

תפקידו העיקרי של מכ"ם העקיבה הוא לעקוב אחר מטרות נעות ולדייק מאוד בקביעת מקום המטרה כלומר - מרחק, כיוון וגובה, מכאן שאלומת השידור של מערכת כזו היא צרה ביותר בכל המישורים (אלומת עיפרון). ענן מוץ שיפוזר מול מכ"ם כזה יסתיר רק מטוס אשר יטוס בתוך הענן עצמו. כאשר המטוס ייצא מהענן עלול מכ"ם זה לגלותו שוב. במקרה זה תפקידו של המוץ הוא ל"שבור את הנעילה" של מכ"ם העקיבה מהמטוס המתגונן. בגלל האלומה הצרה קשה הנעילה בשנית על המטרה המתחמקת.

במרבית המכ"מים קיימת האפשרות למחיקת הדים קבועים. זיהוי ענן המוץ בעזרת עקרון דופלר ומחיקתו ממסכי

ההספק המוחזר (PR) מהמטרה והנקלט במכ"ם תלוי בתכונות המכ"ם:

(א) הספק השידור - Pt
 (ב) הגבר האנטנה לשידור - GT
 (ג) הגבר האנטנה לקליטה - GR
 (ד) תדר השידור - F

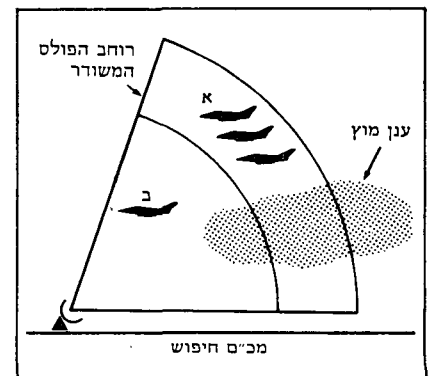
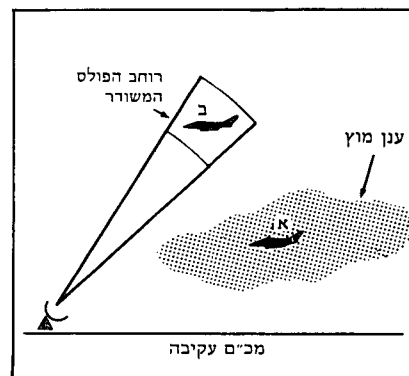
וכן גם במטרה:

(א) מרחק המטרה מהמכ"ם - R
 (ב) שטח החתך המכ"מי - A

הקשר בין כל הפרמטרים הללו מתבטא בנוסחת המכ"ם:

$$PR = K \times \frac{GT \times GR \times Pt}{F^2} \times \frac{A}{R^4}$$

= K קבוע אופייני למכ"ם



המטוס המסומן ב' חשוף וגלוי למכ"ם ואילו המטוס בתוך ענן המוץ (מסומן א') לא ניתן לגילוי.

המטוסים (המסומנים א') בשרטוט מוסתרים על-ידי ענן המוץ למרות שאינם טסים בתוכו, ואילו המטוס (המסומן ב') גלוי.